烧结

# 基于无碳烧结的褐铁矿型红土镍矿固结机理研究

刘佳文[1,2]，陈铁军[1,2]，周仙霖[1,2]，万军营[1,2]，师本敬[3]，王兆才[3]

（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点试验室，湖北 武汉 430081；3. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

**摘要：** 为有效降低褐铁矿型红土镍矿烧结碳排放，促进其烧结矿中液相的形成，加强其烧结矿的结构强度，本文采用无碳烧结方法，并基于热力学分析，对该红土镍矿在无碳烧结环境下不同温度、碱度条件的烧结反应机理进行了研究。结果表明：无碳烧结温度对其液相生成量有显著影响；碱度的提高可促进 $Fe_2O_3$ 进一步熔解进入液相中，铁酸钙类矿物逐步上升，尖晶石类矿物逐渐减少；在碱度高于 1.6 时，无碳烧结矿随碱度的升高出现了更多的孔洞与裂缝；相同碱度条件下，无碳烧结能够生成足够多的主要液相组分（尖晶石类矿物），其烧结矿微观结构更加紧密。

**关键词：** 无碳烧结；褐铁矿型红土镍矿；热力学分析；固结机理

**中图分类号：** TF046.4　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764（2022）03－0001－07

**doi：** 10.13403/j.sjqt.2022.03.032

## Research on consolidation mechanism of limonite-type laterite nickel ore based on carbon-free sintering

LIU Jiawen[1,2], CHEN Tiejun[1,2], ZHOU Xianlin[1,2], WAN Junying[1,2], SHI Benjing[3], WANG Zhaocai[3]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 2. *Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 3. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*)

**Abstract:** In order to effectively reduce the sintering carbon emission from the limonite-type laterite nickel ore, promote the formation of liquid phase in its sinter, and strengthen the structural strength of its sinter, the sintering reaction mechanism of this limonite-type nickel ore under different temperature and alkalinity conditions in a carbon-free sintering environment is investigated by using a carbon-free sintering method and based on thermodynamic analysis. The results show that: the temperature of carbon-free sintering has a significant effect on its liquid phase production; the increase of alkalinity can promote the further melting of $Fe_2O_3$ into the liquid phase, and the calcium ferrite minerals gradually rise and the spinel minerals gradually decrease; at the alkalinity higher than 1.6, more voids and cracks appear in the carbon-free sinter with the increase of alkalinity; under the same alkalinity condition, the carbon-free sintering could generate with enough main liquid components spinel-like minerals and more compact sinter microstructure.

**Key words:** carbon-free sintering; limonite-type laterite nickel ore; thermodynamic analysis; consolidation mechanism

钢铁工业是实现绿色低碳发展的重要领域，作为工业领域能源消耗和排放大户，钢铁工业占我国碳排放总量的 15% 左右，也是工业领域实现碳中和与碳达峰的重点行业。为了进一步

**收稿日期：** 2022－01－17；**修回日期：** 2022－03－01

**基金项目：** 中冶长天基础研究基金资助项目（2020JCYJ06）

**作者简介：** 刘佳文（1998—），男，硕士研究生，从事烧结球团方面的研究。

**通讯作者：** 周仙霖（1986—），男，博士，讲师，从事资源综合利用及铁矿造块方向的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

促进传统烧结工艺的节能减排，有必要对其进行创新性的改进和优化[1]。

烧结高炉法处理褐铁矿型红土镍矿，可以充分利用正常冶炼所淘汰的小型高炉，将铁品位高、镍品位低的褐铁矿型红土镍矿冶炼成镍铁合金，并有效降低不锈钢的冶炼成本[2-3]。同时，该方法还具有原料适应性强、投资低等优点，因此在不锈钢产业得到了广泛应用。

中南大学朱德庆团队近年对红土镍矿烧结进行了大量研究，开发了废弃块矿作铺底料强化烧结技术[4]、加压致密化烧结技术[5]、热废气循环烧结技术[6]、多力场协同强化烧结技术[7]，以及球团烧结技术[8]，显著改善了红土镍矿烧结矿产、质量指标，有力地促进了节能减排。重庆大学白晨光等[9]针对印度尼西亚红土镍矿的干燥、烧结问题，进行了原矿的化学成分测定、热重、差热试验以及X射线衍射(XRD)分析，利用自制的烧结杯系统进行了不同配碳量的烧结试验，并对成品矿样进行了XRD及微观结构分析，研究结果表明辉石($MgFeSi_2O_6$)和镁方铁矿[$Mg(Ni)Fe_2O_4$]是红土镍矿烧结的主要黏结相。但研究所使用的红土镍矿属于硅镁镍型红土镍矿，其固结机理与褐铁矿型红土镍矿有较大差异。

基于褐铁矿型红土镍矿烧结中存在的强度低、燃耗高、产量低、利用系数低等问题，相关研究人员根据传统烧结的改善思路进行了相关研究，并取得了一定的效果，但效果相对有限(固体燃料消耗依然高达128.42 $kg_{标煤}/t$[6])。鉴于在烧结过程中，燃料碳实际上并没有参与固结反应过程，仅在燃烧过程中提供了热量来促使铁酸钙等黏结物相的生成。因此，研究人员基于无碳烧结的概念，结合烧结反应过程，借鉴球团带式焙烧机工艺，提出了一种新型薄料层快速无碳烧结新技术[10-11]。该技术利用富氢气体代替固体燃料为烧结过程提供热量，从源头减少碳素输入，其不仅为红土镍矿烧结减排提供了更大的空间，同时也为进一步探究其成矿机理、实际应用提供了理论支持。本文基于无碳烧结方法，研究了红土镍矿在无碳烧结过程中温度及碱度对固结的影响。

## 1 试验原料与方法

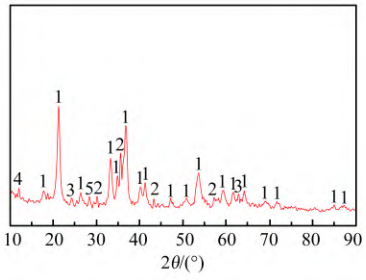
### 1.1 试验原料

试验选用化学分析纯试剂CaO(熔剂)与褐铁矿型红土镍矿作为原料。褐铁矿型红土镍矿的主要化学成分及矿样的XRD分析结果分别如表1与图1所示。由表1可知，该红土镍矿中铁品位为46.69%，Ni品位为0.76%，烧损高达15.91%，属于典型的“高铁低镍”褐铁矿型红土镍矿。

表1 褐铁矿型红土镍矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical constituents of limonite-type laterite nickel ore %

| TFe | FeO | $SiO_2$ | CaO | MgO | $Al_2O_3$ | Ni | $Cr_2O_3$ | P | S | LOI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 46.69 | 6.38 | 7.31 | 0.82 | 3.27 | 7.20 | 0.76 | 4.75 | 0.008 | 0.152 | 15.91 |




1—针铁矿；2—磁铁矿；3—赤铁矿；
4—镍蛇纹石；5—鳞石英。

图1 褐铁矿型红土镍矿XRD分析

Fig. 1 XRD analysis of limonite laterite nickel ore

由图1可知，该红土镍矿中主要物相为针铁矿[FeO(OH)]、磁铁矿($Fe_3O_4$)、赤铁矿($Fe_2O_3$)、镍蛇纹石($2NiO_2MgO_3SiO_2\cdot6H_2O$)和鳞石英($SiO_2$)。其中，铝主要富集于硬质或黏土状针铁矿中，镁主要赋存于镍蛇纹石中，而硅主要赋存于镍蛇纹石和鳞石英中。褐铁矿型红土镍矿中铝、硅、镁的赋存状态与普通铁矿石有着很大不同，这将对其烧结性能及成矿机理产生重大影响。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 1.2　试验方法

试验将所用褐铁矿型红土镍矿破碎至 -0.074 mm 后，与分析纯化学试剂 CaO 进行混匀配料，再使用 10 mm × 15 mm 规格的圆柱压样机进行压制，单个压制好的圆柱体状原料为 2.5 g，每 4 个为一组烘干后使用管式炉焙烧。采用的热工制度：预热段温度为 950 ℃，反应 5 min；烧结段温度为 1 260 ~ 1 350 ℃，持续反应 15 min。每个条件均重复进行三组实验，将冷却后的反应后物料平均分为 3 份，分别进行：① 破碎至 -0.074 mm，进行 XRD 分析矿物组成；② 冷镶制样后，使用金相显微镜观察分析矿物结构；③ 留作备用。原料制备流程示意与焙烧流程示意分别如图 2、3 所示。

表 2 为碱度在 1.6 条件下的烧结杯实验原料配比(湿基)。其中，一次混合在∅700 mm × 700 mm 立卧式混料机中进行，转速为 22 r/min，填充率为 11%，混料时间为 3 min，二次混合在∅600 mm × 1200 mm 圆筒混合机中进行，转速为 20 r/min，填充率为 9%，制粒时间为 6 min，然后取料检测混合料透气性和粒度组成。烧结杯实验在∅250 mm × 800 mm 烧结杯中进行，料层高度为 770 mm，点火时间为 1.5 min，点火温度为(1 100 ± 50) ℃，点火负压为 5 kPa，烧结负压为 10 kPa。到达烧结终点时，抽取负压调低至 4 kPa，烧结矿冷却至 150 ℃后卸料。取成品矿进行分析。

表 2　烧结杯实验原料配比(质量分数)

Table 2　Sintering cup ratio　　%

| 高返 | 重力除尘灰 | 烧结除尘灰 | 无烟煤 | 红土镍矿 | 生石灰 | 内返 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 17.0 | 2.3 | 2.0 | 5.2 | 63.0 | 3.3 | 8.0 |

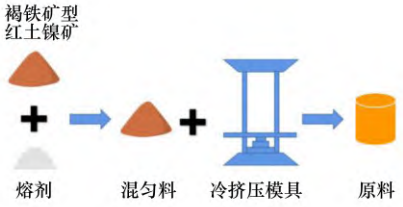



图 2　原料制备示意

Fig. 2　Schematic diagram of raw material preparation

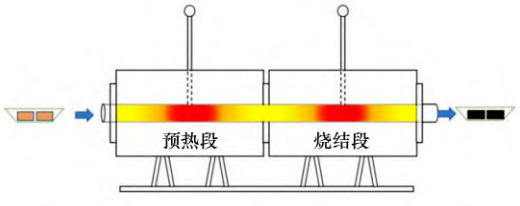



图 3　原料焙烧示意

Fig. 3　Diagram of raw material roasting

### 1.3　热力学分析方法

在本研究中，应用化学热力学软件 FactSage 中的 Equilib 和 Phase Diagram 模块，选择 FToxid-SLAGA 来计算烧结过程中的液相生成。基于烧结反应中含有的较多的 FeO、MgO、CaO、$Al_2O_3$ 等渣相元素，选择 FToxid-MeO、FToxid-WOLLA、FToxid-bC2S、FToxid-OlivA、FToxid-cPyr、FToxidCAF2、FToxid-CA2F、FToxid-CAF 等数据库来计算反应中可能进行的尖晶石、橄榄石、铁酸钙等物相的生成，反应原料换算为氧化物，可从 FToxid 化合物数据库中选取。

配料相关元素均换算为氧化物，相关铁氧化物根据全铁以及亚铁质量分数换算为 $Fe_2O_3$ 和 FeO，具体计算各物质理论质量配比如表 3 所示。

表 3　质量配比表(质量分数)

Table 3　Mass ratio table　　%

| 碱度 | $Fe_2O_3$ | CaO | $Cr_2O_3$ | FeO | $SiO_2$ | MgO | $Al_2O_3$ | NiO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.6 | 68.87 | 11.08 | 4.99 | 0.40 | 8.01 | 3.45 | 7.57 | 1.01 |

## 2　结果与讨论

### 2.1　温度的影响

#### 2.1.1　温度对液相量的影响

根据褐铁矿型红土镍矿烧结相关经验，在碱度为 1.6 的条件下对该烧结矿生成液相的初始温度和完全反应温度进行计算得出其分别约为1 260 ℃与 1 612 ℃。结合实际烧结条件，在

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 260 ~ 1 410 ℃范围内计算了烧结温度对液相量的影响，其结果如图 4 所示。由图 4 可知，烧结温度的提高有助于液相的生成，在 1 290 ~ 1 320 ℃范围内物料生成液相量出现较大幅度增长，当反应温度高于 1 350 ℃时，液相量增长趋于平缓。在这一过程中，铁得到了进一步的熔解，该过程极大地增加了液相的生成。

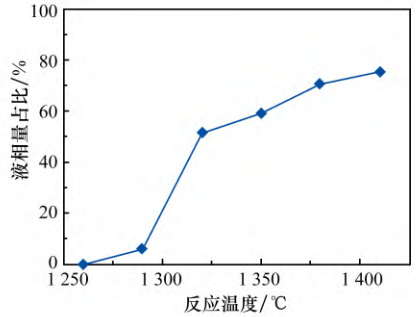



图 4 碱度为 1.6 时烧结温度对液相生成量的影响

Fig. 4 Influence of sintering temperature on liquid phase production at basicity 1.6

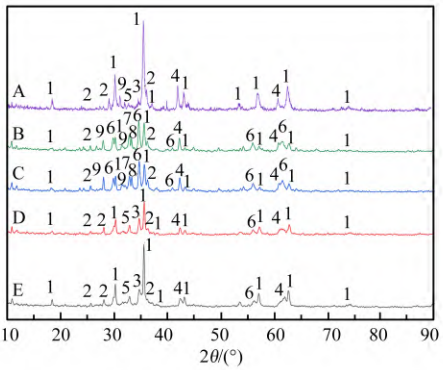
2.1.2 温度对固结物相的影响

图 5 为不同温度下褐铁矿型红土镍矿无碳烧结与烧结杯试验烧结矿 XRD 分析结果。由图 5 可知，作为传统烧结矿中主要黏结相物质的铁酸钙类矿物，在褐铁矿型红土镍矿烧结反应中随着反应温度的增加而逐渐减少。在烧结杯实验中，铁酸钙类矿物占比很低，这是因为燃烧带反应温度高达 1 350 ℃以上[12]，远高于赤铁矿类矿物生成铁酸钙的适宜温度 1 250 ~ 1 270 ℃，铁酸钙类矿物部分分解，生成尖晶石类矿物与复合铁酸钙类矿物，另外部分硅酸盐类矿物也开始由 $\beta$ 型向 $\gamma$ 型转变，其他部分生成橄榄石类矿物。

过高的温度、劣化的矿物、较多的水分均是影响褐铁矿型红土镍矿固结机理的重要因素，也是降低燃料消耗、提高产率的重要突破点。在无碳烧结试验中并未添加返矿等矿物，相较于烧结杯试验生成更多的铁酸钙类矿物，更有利于烧结反应的进行，与烧结杯实验碱度为 1.6、煤粉配比为 5.20% 相比，铁尖晶石与铁橄榄石的衍射峰更加明显。

2.2 碱度的影响

2.2.1 碱度对液相的影响




A—烧结杯碱度为 1.6；B—无碳烧结温度为 1 260 ℃；C—无碳烧结温度为 1 290 ℃；D—无碳烧结温度为 1 320 ℃；E—无碳烧结温度为 1 350 ℃

1 —铁尖晶石［$(Fe,Mg)(Fe,Al)_2O_4$］；2 —钙铁橄榄石（$CaO·FeO·SiO_2$）；3—复合铁酸钙（SFCA）；4—铁橄榄石（$2FeO·SiO_2$）；5 —钙镁橄榄石（$CaO·MgO·SiO_2$）；6—铁酸钙（CF）；7—硅酸钙（$CaSiO_4$）；8—赤铁矿（$Fe_2O_3$）；9—镁黄长石（$Ca_2MgSi_2O_7$）。

图 5 不同温度下褐铁矿型红土镍矿无碳烧结与烧结杯实验烧结矿 XRD 分析结果

Fig. 5 XRD analysis results of carbonless sintering and sinter cup test of limonite laterite nickel ore at different temperatures

碱度对于烧结有着极其重要的意义，在本研究中参考现场烧结，以适宜碱度为 1.6 和极端碱度为 1.0、2.0 的进行成分计算。在 1 260 ~ 1 410 ℃范围内 $Fe_2O_3$-CaO-$SiO_2$-$Al_2O_3$-MgO 五元液相投影线与不同碱度条件下无碳烧结中原料反应后液相各组分及其质量分数分别如图 6、7 所示。

由图 6 可知，随着温度的上升，液相投影线向富铁区移动，生成物主要为尖晶石类矿物，并且在 1 350 ℃以后，有 $Ca_2SiO_4$ 和 $MgSi_2O_8$ 出现，说明高熔点液相生成。在反应碱度区间为 1.0 ~ 2.0 时，液相投影线区间随着碱度的增长而逐渐减少，且多为高熔点物质，不易于烧结反应的进行。这说明在褐铁矿型红土镍矿烧结过程中，碱度过高并不利于提高烧结矿的强度，结合液相各组分及其占比，随着碱度增加而增加的液相主要成分应为铁尖晶石类矿物。

由图 7 可知，液相的主要成分为 $Fe_2O_3$，随着温度的进一步提高，液相量占比平稳上升，$Fe_2O_3$ 进一步熔解到液相中。在碱度上升过程

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

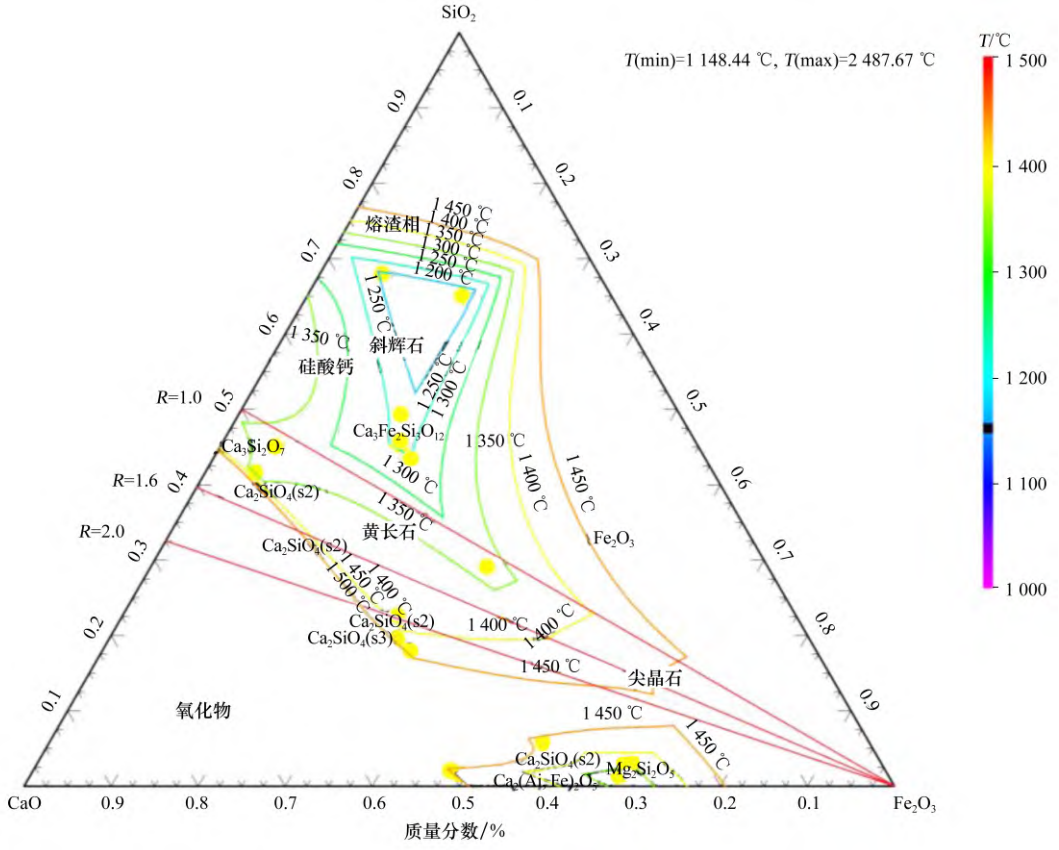
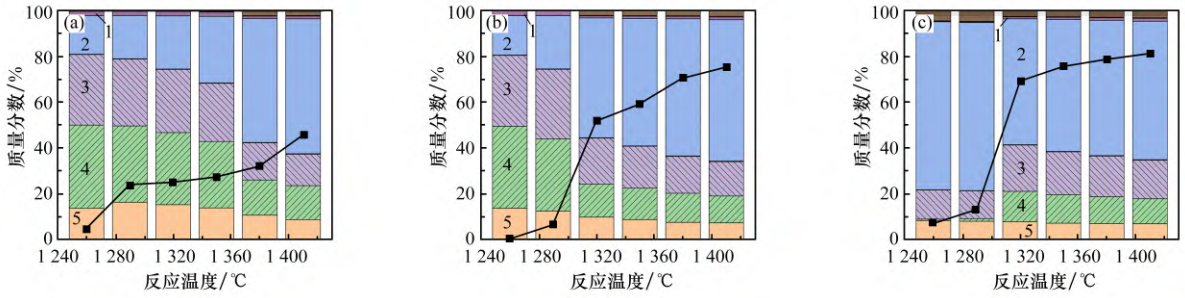



**图 6　$Fe_2O_3$-CaO-$SiO_2$-$Al_2O_3$-MgO 五元液相投影线**

**Fig. 6　$Fe_2O_3$-CaO-$SiO_2$-$Al_2O_3$-MgO five-element liquid phase projection line**




(a)　$R_2$ = 1.0；(b)　$R_2$ = 1.6；(c)　$R_2$ = 2.0

1—MgO；2—$Fe_2O_3$；3—CaO；4—$SiO_2$；5—$Al_2O_3$。

**图 7　不同碱度条件下无碳烧结液相量以及液相量组分随温度变化趋势**

**Fig. 7　Under different basicity conditions, the liquid content of carbonless sintering and its composition change with temperature**

中，烧结过程所产生的液相量逐渐上升，$Fe_2O_3$ 在液相中的占比也进一步上升，结合液相生成过程中各元素的溶解情况，在碱度升高过程中，烧结矿液相中形成了复合铁酸钙类物质和尖晶石类物质，增加了产生的液相量。

2.2.2　碱度对固结物相的影响

图 8 为不同碱度条件下无碳烧结矿及烧结杯烧结矿的 XRD 分析结果。由图 8 可知，无碳烧结矿随着碱度从 1.0 提高到 2.0，铁尖晶石与钙镁橄榄石的衍射峰不断增强，复合铁酸钙的衍射峰也逐渐变强。这是因为随着 CaO 的增加，$Fe_2O_3$ 进一步的溶解进液相中，并促进了 $Mg^{2+}$、$Al^{3+}$ 离子的扩散。与烧结杯结果相比，同样在碱度为1.6条件下，无碳烧结中的尖晶石类矿

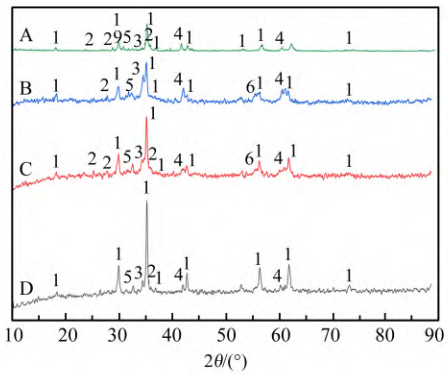
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

物更为明显，更有利于烧结的进行。

2.2.3 碱度对固结显微结构的影响

不同碱度无碳烧结及烧结杯($R=1.6$)条件下烧结矿显微结构如图 9 所示。由图 9 可知，随着碱度提高，赤铁矿主要以自形晶和少量他形晶存在，与铁酸钙有较为明显的界面，铁氧化物与尖晶石类矿物呈现斑状结构，并逐渐密集，在这一过程中，形成了较少的铁酸钙，呈条状，零星的分布于铁氧化物与尖晶石类矿物中。在碱度为 1.6 时，结构最为密集；碱度提高至 2.0 时，细小孔洞逐渐增加，烧结效果逐渐变差，由此，适宜褐铁矿型红土镍矿烧结的最佳碱度为 1.6。

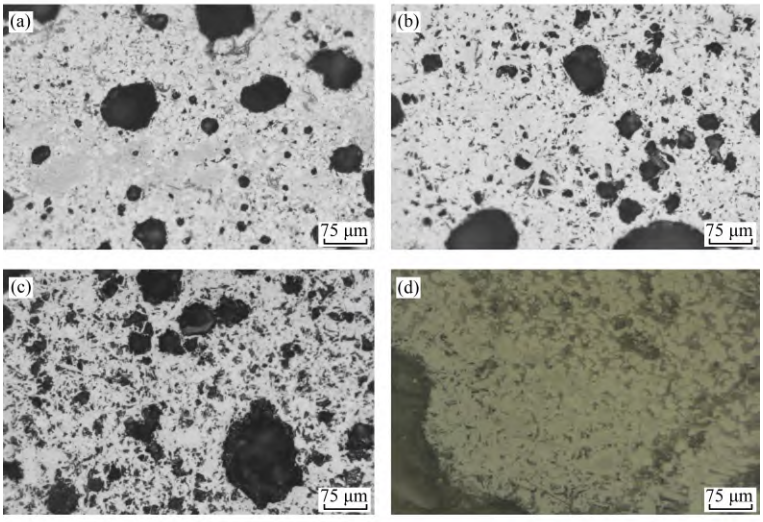
与图 9(d)所示的碱度为 1.6、煤粉配比为 5.20% 的烧结杯试验烧结矿微观结构相比，相同条件下的无碳烧结烧结矿具有更加明显的交织熔蚀结构，能够生成足够多的主要液相组分尖晶石类矿物，烧结矿微观结构更加紧密，SFCA 占比增加，并且针状和交织溶蚀状结构优于块状结构，促进了烧结矿强度的提高。




A—烧结杯碱度为 1.6；B—无碳烧结碱度为 1.6；
C—无碳烧结碱度为 1.4；D—无碳烧结碱度为 1.0
1—铁尖晶石[$(Fe,Mg)(Fe,Al)_2O_4$]；
2—钙铁橄榄石($CaO\cdot FeO\cdot SiO_2$)；3—复合铁酸钙(SFCA)；
4—铁橄榄石($2FeO\cdot SiO_2$)；5—钙镁橄榄石($CaO\cdot MgO\cdot SiO_2$)；
6—铁酸钙(CF)；7—硅酸钙($CaSiO_4$)；
8—赤铁矿($Fe_2O_3$)；9—镁黄长石($Ca_2MgSi_2O_7$)。

**图 8 不同碱度条件下无碳烧结矿及烧结杯烧结矿的 XRD 分析**

**Fig. 8 XRD analysis of carbonless sinter and sinter cup sinter under different basicity conditions**




(a) 无碳烧结 $R_2=1.0$；(b) 无碳烧结 $R_2=1.6$；(c) 无碳烧结 $R_2=1.6$；(d) 烧结杯实验 $R_2=1.6$

**图 9 不同碱度条件下的矿物显微结构**

**Fig. 9 Mineral microstructure under different basicity conditions**

## 3 结 论

(1) 无碳烧结温度对液相生成量有显著影响，随着温度的升高，铁酸钙类矿物出现了先升高后降低的现象，尖晶石类矿物逐渐变为液相的主要成分。

(2) 适宜无碳烧结的碱度条件为 1.6。

(3) 与相同碱度的烧结杯实验对比，无碳烧结能够生成足够多的主要液相组分尖晶石类矿物，烧结矿微观结构更加紧密，SFCA 占比增

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加，并且针状和交织溶蚀状结构优于块状结构，促进了烧结矿强度的提高。

## 参考文献:


[1] 王兆才，刘臣，李继淦，等．烧结烟气 $CO_x$ 的生成机理及减排措施[J]．烧结球团，2021，46(1)：14－22.
WANG Z C，LIU C，LI J G，et al. Generation mechanism and emission reduction measures of $CO_x$ in sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(1)：14－22.

[2] ECKELMAN M J. Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry[J]. Resources Conservation & Recycling，2010，54(4)：256－266.

[3] TIAN H Y，PAN J，ZHU D Q，et al. Improved beneficiation of nickel and iron from a low-grade saprolite laterite by addition of limonitic laterite ore and $CaCO^{3-}$ science direct[J]. Journal of Materials Research and Technology，2020，9(2)：2578－2589.

[4] 朱德庆，薛钰霄，潘建，等．废弃块矿作铺底料强化红土矿烧结工艺及机制[J]．钢铁研究学报，2020，32(7)：591－600.
ZHU D Q，XUE Y X，PAN J，et al. Sintering performance and mechanism of limonite laterite strengthened by using waste lump ore as hearth layer[J]. Journal of Iron and Steel Research，2020，32(7)：591－600.

[5] XUE Y X，ZHU D Q，PAN J，et al. Effective utilization of limonitic nickel laterite via pressurized densification process and its relevant mechanism[J]. Minerals，2020，10(9)：750.

[6] ZHU D Q，XUE Y X，PAN J，et al. Co-Benefits of $CO_2$ emission reduction and sintering performance improvement of limonitic laterite via hot exhaust-gas recirculation sintering[J]. Powder Technology，2020，373：727－740.

[7] 薛钰霄，潘建，朱德庆，等．红土镍矿烧结节能降耗技术研究及应用[J]．中国冶金，2021，31(9)：92－97.
XUE Y X，PAN J，ZHU D Q，et al. Research and application on energy saving and consumption reduction technology of lateritic nickel ore sintering[J]. China metallurgical，2021，31(9)：92－97.

[8] 郭正启，詹若宁，朱德庆，等．铁矿粉球团烧结试验研究[J]．烧结球团，2022，47(1)：87－94.
GUO Z Q，ZHAN R N，ZHU D Q，et al. Experimental study on iron ore powder pelletizing sintering[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：87－94.

[9] 郭恩光．褐铁矿型红土镍矿烧结行为研究及工艺优化[D]．重庆：重庆大学，2014.
GUO E G. Sintering behaviour and process optimization of nickel laterite based of limonitic style[D]. Chongqing：Chongqing University.

[10] 陈铁军，万军营，周仙霖，等．一种铁矿粉无碳烧结系统：CN202120212221.0[P]，2021－09－28.
CHEN T J，WAN J Y，ZHOU X L，et al. The invention relates to a carbonless sintering system for iron ore powder：CN202120212221.0[P]，2021－09－28.

[11] 陈铁军，万军营，周仙霖，等．一种铁矿粉无碳烧结方法及系统：CN202110103629.9[P]，2021－04－27.
CHEN T J，WAN J Y，ZHOU X L，et al. The invention relates to a carbonless sintering method and system for iron ore powder：CN202110103629.9[P]，2021－04－27.

[12] HAO Z，LIU Z，MING C，et al. Influence of coke combustion on $NO_x$ emission during iron ore sintering[J]. Energy & Fuels，2015，29(2)：974－984.


## 本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net